

日 本 国 特 許 庁
JAPAN PATENT OFFICE

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出 願 年 月 日 2 0 0 3 年 1 月 2 7 日
Date of Application:

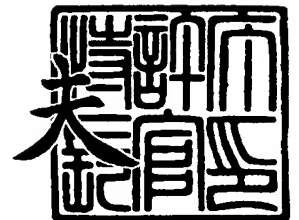
出 願 番 号 特 願 2 0 0 3 - 0 1 7 3 1 0
Application Number:
[ST. 10/C]: [J P 2 0 0 3 - 0 1 7 3 1 0]

出 願 人 日 本 原 子 力 研 究 所
Applicant(s):

2 0 0 3 年 1 2 月 1 日

特許庁長官
Commissioner,
Japan Patent Office

今 井 康



出証番号 出証特 2 0 0 3 - 3 0 9 9 1 9 3

【書類名】 特許願

【整理番号】 030184

【提出日】 平成15年 1月27日

【あて先】 特許庁長官殿

【国際特許分類】 G01T 1/00

【発明者】

【住所又は居所】 茨城県那珂郡東海村白方字白根 2 番地の 4 日本原子力
研究所 東海研究所内

【氏名】 片桐 政樹

【発明者】

【住所又は居所】 茨城県那珂郡東海村白方字白根 2 番地の 4 日本原子力
研究所 東海研究所内

【氏名】 中村 龍也

【発明者】

【住所又は居所】 京都府京都市左京区吉田泉殿町 6 4 - 1 5

【氏名】 神野 郁夫

【発明者】

【住所又は居所】 東京都杉並区高井戸東 1 - 2 7 - 2 0

【氏名】 杉浦 修

【特許出願人】

【識別番号】 000004097

【氏名又は名称】 日本原子力研究所

【代理人】

【識別番号】 100089705

【住所又は居所】 東京都千代田区大手町二丁目 2 番 1 号 新大手町ビル 2
0 6 区 ユアサハラ法律特許事務所

【弁理士】

【氏名又は名称】 社本 一夫

【電話番号】 03-3270-6641

【選任した代理人】

【識別番号】 100076691

【弁理士】

【氏名又は名称】 増井 忠武

【選任した代理人】

【識別番号】 100075270

【弁理士】

【氏名又は名称】 小林 泰

【選任した代理人】

【識別番号】 100080137

【弁理士】

【氏名又は名称】 千葉 昭男

【選任した代理人】

【識別番号】 100096013

【弁理士】

【氏名又は名称】 富田 博行

【選任した代理人】

【識別番号】 100092015

【弁理士】

【氏名又は名称】 桜井 周矩

【手数料の表示】

【予納台帳番号】 051806

【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】

【物件名】 明細書 1

【物件名】 図面 1

【物件名】 要約書 1

【包括委任状番号】 9706383

【プルーフの要否】 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 化合物半導体 I n S b 単結晶を用いた半導体放射線検出器

【特許請求の範囲】

【請求項 1】

化合物半導体である I n S b を母材とした単結晶を用いた放射線検出器において、不純物を人工的にドーピングしない高純度 I n S b 単結晶を用いることとし、この高純度 I n S b 単結晶に表面障壁層を形成してダイオード特性を持たせた半導体素子を作製し、2 K 以上 5 0 K 以下の温度で動作させることを特徴とした化合物半導体 I n S b 単結晶を用いた半導体放射線検出器。

【請求項 2】

化合物半導体である I n S b を母材とした単結晶を用いた放射線検出器において、不純物を人工的にドーピングしない高純度 I n S b 単結晶を用いることとし、この高純度 I n S b 単結晶に p n 接合を形成しダイオード特性を持たせた半導体素子を作製し、2 K 以上 1 1 5 K 以下の温度で動作させることを特徴とした化合物半導体 I n S b 単結晶を用いた半導体放射線検出器。

【請求項 3】

化合物半導体である I n S b を母材とした単結晶を用いた放射線検出器において、I n S b 単結晶に G e をドーピングして p 型 I n S b 単結晶として、この p 型 I n S b 単結晶に p n 接合を形成してダイオード特性を持たせた半導体素子を作製し、4. 2 K 以上 1 1 5 K 以下の温度で動作させることを特徴とした化合物半導体 I n S b 単結晶を用いた半導体放射線検出器。

【請求項 4】

請求項 2 及び請求項 3 において、p n 接合を形成する場合に、S n を熱的に拡散して n 型電極を形成することを特徴とした化合物半導体 I n S b 単結晶を用いた半導体放射線検出器。

【請求項 5】

請求項 3 において、7 0 K 以上 1 1 5 K 以下の温度温度で動作させる場合、電荷有感型前置増幅器から出力される信号が、電子あるいは正孔のトラッピングが少なくなることに起因して 1 μ s 以下となることを利用して、主増幅器の波形整

形時定数を $2 \mu s$ 以下に設定し、パルス波高分析を行い、放射線スペクトルを得ることを特徴とした化合物半導体 I n S b 単結晶を用いた半導体放射線検出器。

【発明の詳細な説明】

【0 0 0 1】

【発明の属する技術分野】

本発明は、半導体を用いた放射線検出器に関するものであり、特に半導体として化合物半導体である I n S b 単結晶を用いることを特徴としている。I n S b はバンドギャップが現在最も小さい化合物半導体であり、放射線によって半導体内に生成される電子・正孔対が最も多い化合物半導体であるため、エネルギー分解能特性がこれまでの半導体検出器に比較して向上する。このため、高エネルギー分解能 X 線検出器として、蛍光 X 線分析や放射光施設などにおける X 線スペクトロメトリに利用される。また、I n 及び S b とも従来ガンマ線検出器として用いられてきた G e に比較し原子番号が大きな元素であることから、検出効率が高くかつ高エネルギー分解能の γ 線スペクトロメータ用のガンマ線検出器として用いられる。

【0 0 0 2】

【従来技術】

半導体を用いた高エネルギー分解能 X 線検出器としては、従来バンドギャップエネルギーが比較的低い S i (L i) 検出器あるいは G e 検出器が用いられており、6 k e V の X 線を測定する場合、エネルギー分解能の限界は約 1 2 0 e V である。

【0 0 0 3】

一方、I n S b 化合物半導体のバンドギャップエネルギーは 0. 1 6 5 e V と非常に小さく、放射線検出器として用いることができる可能性があることは Wm. C. McHarris によって 1 9 8 6 年に指摘されていた（非特許文献 1 参照）。しかし、赤外線検出器としては開発されたものの、I n S b 化合物半導体を用いた放射線検出器は最近まで実際に開発されることをなかった。

【0 0 0 4】

最近、神野等は、I n S b 単結晶に G e をドーピングした p 型 I n S b 単結晶に M

oを用いて表面障壁層を形成してダイオード特性を持たせた図11に示す構造の半導体素子を作製し、4.2 K以下の温度で動作させ、 α 線を検出できることを報告している（非特許文献2参照）。

【0005】

【非特許文献1】

Nucl. Instrum. & Meth. A242, 373(1986)

【非特許文献2】

Review of Scientific Instruments, Vol.73, No.7, 2533(2002)

【0006】

【発明が解決しようとする課題】

従来の半導体放射線検出器であるSi検出器、Si(Li)検出器およびGe検出器に比較し、電子・正孔対を多く生成し、大きな信号出力が得られるInSb単結晶を用いた半導体検出器を製作することが課題となる。最終的には、InSb単結晶を用いることにより、電子・正孔対を数多く生成できることからエネルギー分解能のさらなる改善が可能となる。

【0007】

また、従来技術であるp型InSb単結晶にMoを用いて表面障壁層を形成して作製した半導体検出器では、漏洩電流が大きく4.2 K以下でしか使用できないことから、10 K以上の温度でも使用可能なInSb単結晶を用いた半導体検出器を製作することが課題となる。10 K以上で動作可能とすることにより、クローズドサイクルHe冷凍機を用いて電氣的に容易に冷却が可能となる。さらに、77 K以上で動作可能な検出器とすることにより、液体窒素を用いて冷却する安価な半導体検出器を製作することが可能となる。

【0008】

さらに、Si検出器、Si(Li)検出器およびGe検出器の場合、Si及びGeとも原子番号が小さいため、ガンマ線検出器とするためには大きな結晶を用いる必要がある。このため、小さな結晶でも検出感度の高くなる原子番号の大きな元素を構成材料とする半導体検出器を製作することが課題となる。

【0009】

【課題を解決するための手段】

化合物半導体 InSb は、バンドギャップエネルギーが 0.165 eV であり、 Si の 1.1 eV の約 $1/6$ 、 Ge の 0.67 eV の約 $1/3$ 以下である。このため、同じエネルギーの放射線を InSb と Si で検出した場合、 InSb は Si に比較し 6 倍の数の電子・正孔対が生成され、統計誤差としては約 2.4 倍小さな誤差となる。すなわち、 6 keV の X 線を測定する場合、 Si 検出器や Ge 検出器などの従来の半導体検出器のエネルギー分解能の限界が約 120 eV であるのに対して、 InSb を用いた半導体検出器を製作することにより約 60 eV のエネルギー分解能が期待できる。

【0010】

漏洩電流を小さくし 4.2 K 以上で動作可能な InSb 半導体放射線検出器とするために、不純物をドーピングしない高純度 InSb 単結晶を用いる。また、 Ge をドーピングした p 型 InSb 単結晶を用いる場合には、pn 接合を形成して漏洩電流を低減し、 10 K 以上でも動作可能とする。

【0011】

また、原子番号が In が 49、 Sb が 51 と大きい InSb を用いることにより、X 線やガンマ線の吸収に有利であり小型の半導体放射線検出器を製作することができる。光子との相互作用確率を (原子番号)⁵ × (密度) とすると、 InSb は Si の約 1400 倍、 Ge の約 10 倍となる。すなわち、 100 cc の体積の Ge 検出器と 10 cc の体積の InSb 検出器とが、同等の検出効率を持つことになる。

【0012】**【実施例】****(実施例 1)**

実施例 1 として、本発明による半導体検出器について、図 1 を参照して述べる。放射線の検出媒体として、不純物を人工的にドーピングしない高純度 InSb 単結晶を用い、かつダイオード特性を得るため、表面障壁型電極を形成することを特徴としている。

【0013】

実施例では、InSb単結晶として、住友電工製の大きさが5 mm x 8 mmで、厚さ0.5 mmの高純度InSb単結晶ウエハを用いる。この高純度InSb単結晶ウエハの表面を硝酸：乳酸が1：10の混合液でエッチングした後、Au・Pd合金層を約4 nmの厚さに製膜する。この後、エッチングを行い3 mm ϕ のメサ型電極を形成する。ウエハの片方の面を抵抗性電極とするため、基板であるCuにIn半田で固定する。

【0014】

できあがったInSb半導体素子のダイオード特性を確認するため、2 K、3 K、4.2 K、40 K及び77 Kの温度において電流－電圧特性を測定した。測定結果を図2に示す。2 K、3 K及び4.2 Kの温度ではほとんど同じダイオード特性が得られ、40 Kでもダイオード特性が得られたものの、77 Kでは、電流－電圧特性はほとんど直線となりほとんど抵抗特性となることがわかった。4.2 Kでのダイオード特性は、素子抵抗が1.4 k Ω であることから、神野等が製作したp型InSbに表面障壁層を形成した素子に比較して1桁以上改善している。

【0015】

その後、液体He冷却容器に、InSb半導体素子を取り付けた後、2 Kから50 Kまでの温度で動作させ、 α 線に対する検出特性を測定した。半導体素子の性能を左右するパラメータである電荷有感型前置増幅器からの出力信号のライズタイムをデジタルオシロスコープにより測定した。4.2 Kの温度での測定結果を図3に示す。4.2 Kの温度でも0.4 μ sと非常に短い時間に電荷収集ができることを確認した。このライズタイムは、神野等が製作したp型InSbに表面障壁層を形成した素子が7 μ sであったことを考慮すると1桁以上改善している。4.2 K以上の温度でもこのライズタイム時間はあまり変化しないことも確認された。

【0016】

また、この結果は放射線が入射し高純度InSb内に生成した電子及び正孔がトラッピングされることが少なくそれぞれn型電極及びp型電極に収集されていることを意味しており、損失が少ないことからエネルギー分解能の向上の大きな

要因となる。

【0017】

電荷有感型前置増幅器からの出力信号を主増幅器で波形整形及び増幅したのちマルチチャンネル波高分析器により波高スペクトルを測定した。2 Kから50 Kの温度範囲での α 線波高スペクトルの測定結果を図4に示す。いずれの温度でもシャープな α 線ピークが観測できた。

【0018】

以上の結果、表面障壁層を形成した高純度InSb半導体素子は2 Kから50 Kの温度範囲で電荷の収集損失が少なく α 線を検出可能であることが確認された。

【0019】

(実施例2)

実施例2として、本発明による半導体検出器について、図5を参照して述べる。放射線の検出媒体として、不純物を人工的にドーピングしない高純度InSb単結晶を用い、かつダイオード特性を得るため、pn接合を形成することを特徴としている。

【0020】

実施例では、InSb単結晶として、住友電工製の大きさが5 mm x 8 mmで、厚さ0.5 mmの高純度InSb単結晶ウエハを用いる。この高純度InSb単結晶ウエハの表面を硝酸：乳酸が1：10の混合液でエッチングした後、Sn層を形成する。この後、エッチングを行い3 mm ϕ のメサ型電極を形成する。ウエハの片方の面を抵抗性電極とするため、基板であるCuにIn半田で固定する。

【0021】

できあがったInSb半導体素子のダイオード特性を確認するため、77 Kの温度において電流—電圧特性を測定した。測定結果を図6に示す。77 Kでのダイオード特性は、素子抵抗が140 k Ω であることから、神野等が製作したp型InSbに表面障壁層を形成した素子に比較して3桁以上改善していることがわかった。このダイオード特性は、pn接合を形成した高純度InSb半導体素子

が 2 K から 115 K の温度範囲で放射線を検出可能であることを示している。

【0022】

(実施例 3)

実施例 3 として、本発明による半導体検出器について、図 7 を参照して述べる。放射線の検出媒体として、InSb 単結晶に Ge をドーピングした p 型 InSb 単結晶を用い、かつダイオード特性を得るため、pn 接合を形成することを特徴としている。

【0023】

実施例では、InSb 単結晶として、Wafer Technology 社製の大きさが 5 mm x 8 mm で、厚さ 0.5 mm で Ge を $3.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ドーピングした p 型 InSb 単結晶ウエハを用いる。この p 型 InSb 単結晶ウエハの表面を硝酸：乳酸が 1：10 の混合液でエッチングした後、Sn 層を形成する。この後、エッチングを行い 3 mm ϕ のメサ型電極を形成する。ウエハの片方の面を抵抗性電極とするため、基板である Cu に In 半田で固定する。できあがった InSb 半導体素子のダイオード特性を確認するため、4.2 K から 77 K の温度範囲における電流－電圧特性を測定した。測定結果を図 8 に示す。77 K においても十分なダイオード特性が得られることが確認できた。4.2 K でのダイオード特性は、素子抵抗が約 200 k Ω であることから、神野等が製作した p 型 InSb に表面障壁層を形成した素子に比較して 3 桁以上改善している。また、77 K においても素子抵抗は 25 k Ω あり、高温でも非常に良いダイオード特性が得られることがわかった。

【0024】

その後、液体 He 冷却容器に、本 InSb 半導体素子を取り付けた後、2 K から 115 K までの温度で動作させ、 α 線に対する波高スペクトル特性を測定した。電荷有感型前置増幅器からの出力信号を主増幅器で波形整形及び増幅した後、マルチチャンネル波高分析器により波高スペクトルを測定した。4.2 K から 115 K の温度範囲での α 線波高スペクトルの測定結果を図 9 に示す。

【0025】

以上の結果、pn 接合を形成した p 型 InSb 半導体素子の場合、4.2 K か

ら 115 K の温度範囲で十分 α 線を検出可能であることが確認された。

(実施例 4)

実施例 4 は、図 5 及び図 7 の InSb 半導体素子の p n 接合を形成する場合に、Sn を熱的に拡散して n 型電極を形成することを特徴とした化合物半導体 InSb 半導体検出素子の製法に関するものである。

【0026】

最初に、InSb 単結晶ウエハの表面を硝酸：乳酸が 1：10 の混合液でエッチングした後、Sn を数 nm の厚さに製膜し、その後 Al を 100 nm 製膜する。

【0027】

次に、真空中で、200 度 C から 300 度 C の温度でランプ等の熱源によりアニールし、Sn 層を実施例 3 の場合には約 100 nm の厚さ形成した。

この形成方法により、図 6 と図 8 に示す良好なダイオード特性を持つ p n 接合型 InSb 半導体素子を製作できた。

【0028】

なお、Sn 層の厚さは、粒子線やエネルギーの低い軟 X 線の場合は、電極による吸収の問題があるため、アニール温度とアニール時間を調整し厚さを 10 nm 以下にするようにする必要がある。また、エネルギーの高い X 線やガンマ線の場合はある程度厚くし良好な電極とする方が良い。

【0029】

(実施例 5)

実施例 5 は、実施例 3 で述べた放射線の検出媒体として、InSb 単結晶に Ge をドーピングした p 型 InSb 単結晶を用い、かつ半導体検出器として必要なダイオード特性を得ながら、電荷有感型前置増幅器からの出力信号の α 線に対するライズタイム特性をもとに、パルス波高分析を行うための p n 接合を形成した InSb 半導体検出素子の動作条件に関わるものである。

【0030】

液体 He 冷却容器に、p n 接合を形成した p 型 InSb 半導体検出素子を取り付けた後、4.2 K、10 K 及び 115 K の温度で動作させ、半導体素子の性能

を左右するパラメータである電荷有感型前置増幅器からの出力信号の α 線に対するライズタイム特性をデジタルオシロスコープにより測定した。測定結果を図 10 に示す。4. 2 K の温度ではライズタイムは $20 \mu\text{s}$ と非常に長くトラッピングがかなりあることがわかる。10 K でも $7 \mu\text{s}$ とまだかなりトラッピングの効果が大きいことがわかった。一方、77 K まで温度が上がるとトラッピングがなくなりライズタイムは $1 \mu\text{s}$ 以下になることが確認できた。

【0031】

このため、77 K 以上 115 K 以下の温度で動作させ、電荷有感型前置増幅器から出力される信号のライズタイムが、電子あるいは正孔のトラッピングが少なくなることに起因して $1 \mu\text{s}$ 以下となることを利用して、主増幅器の波形整形時定数を $2 \mu\text{s}$ 以下に設定して、ピークのパルス波高値を波高分析することにより、放射線のエネルギー分析を容易にすると共にエネルギー分解能の向上を図ることができる。

【0032】

また、77 K 以上 115 K 以下の温度条件で本半導体素子を動作させた場合、放射線が入射し高純度 In Sb 内に生成した電子及び正孔がトラッピングされることが少なくそれぞれ n 型電極及び p 型電極に収集されていることを意味しており、損失が少ないことからエネルギー分解能の向上の大きな要因となる。なお、77 K 以上で動作させるということは液体窒素により冷却可能であるため、冷却用の機器のコストを下げることができる。

【0033】

【発明の実施の形態】

バンドギャップエネルギーが 0.165 eV と非常に小さい化合物半導体 In Sb を放射線の検出素子とすることにより、放射線の入射により生成する電子・正孔対の生成量が多くなるため、高エネルギー分解能を持つ半導体放射線検出器を製作することができる。

【0034】

原子番号が In が 49, Sb が 51 と大きい In Sb を用いることにより、X 線やガンマ線の吸収が大きくなり小型の半導体放射線検出器を製作することがで

きる。

【0035】

不純物をドーピングしない高純度 InSb 単結晶を用いた検出媒体とすることにより、電子あるいは正孔のトラップングの少ない放射線検出器を製作することができる。

【0036】

p n 接合型 InSb 検出素子を用いることにより、ダイオード特性の良い半導体放射線検出器とすることができる。

Ge をドーピングした p 型 InSb 検出素子の場合には動作温度を高くすることにより、電子あるいは正孔のトラップングの影響が少ない放射線検出を行うことができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】 不純物を人工的にドーピングしない高純度 InSb 単結晶を用いた表面障壁型半導体放射線検出器を示す図である。

【図2】 高純度 InSb 単結晶を用いた表面障壁型半導体放射線検出器の 2 K、3 K、4.2 K、40 K 及び 77 K の温度における電流—電圧特性を示す図である。

【図3】 4.2 K の温度におけるライズタイム特性の測定結果を示す図である。

【図4】 2 K から 50 K の温度範囲での α 線波高スペクトルの測定結果を示す図である。

【図5】 不純物を人工的にドーピングしない高純度 InSb 単結晶を用いた p n 接合型半導体放射線検出器を示す図である。

【図6】 高純度 InSb 単結晶を用いた p n 接合型半導体放射線検出器の 77 K の温度における電流—電圧特性を示す図である。

【図7】 Ge をドーピングした p 型高純度 InSb 単結晶を用いた p n 接合型半導体放射線検出器を示す図である。

【図8】 p 型高純度 InSb 単結晶を用いた p n 接合型半導体放射線検出器の 4.2 K から 77 K の温度範囲における電流—電圧特性を示す図である。

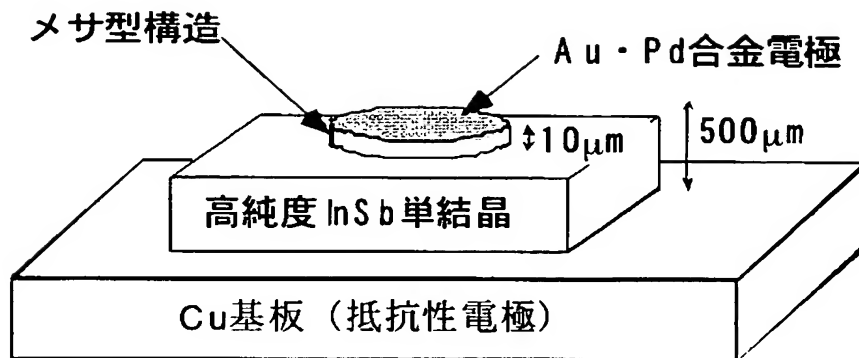
【図 9】 p 型高純度 I n S b 単結晶を用いた p n 接合型半導体放射線検出器の 4 . 2 K から 1 1 5 K の温度範囲での α 線波高スペクトルの測定結果を示す図である。

【図 1 0】 p 型高純度 I n S b 単結晶を用いた p n 接合型半導体放射線検出器の 4 . 2 K、1 0 K 及び 7 7 K の温度におけるライズタイム特性の測定結果を示す図である。

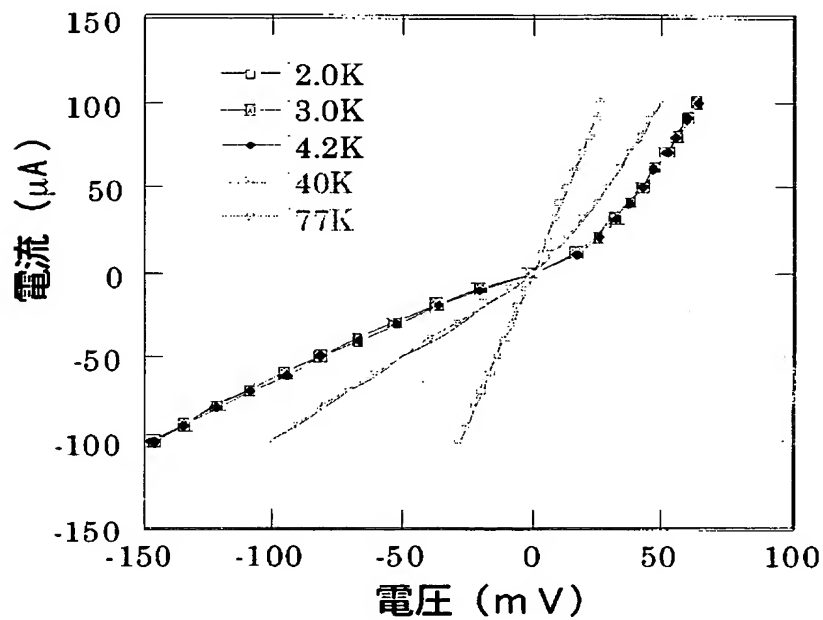
【図 1 1】 従来の G e をドープした p 型 I n S b 単結晶を用いた表面障壁型半導体放射線検出器である。

【書類名】 図面

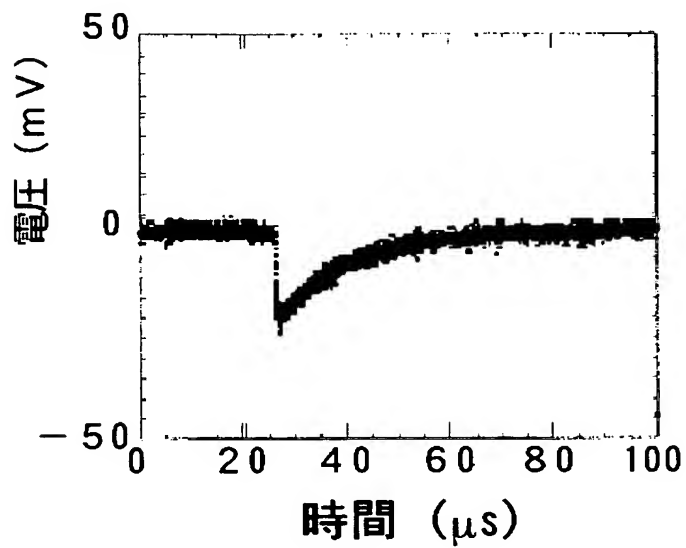
【図 1】



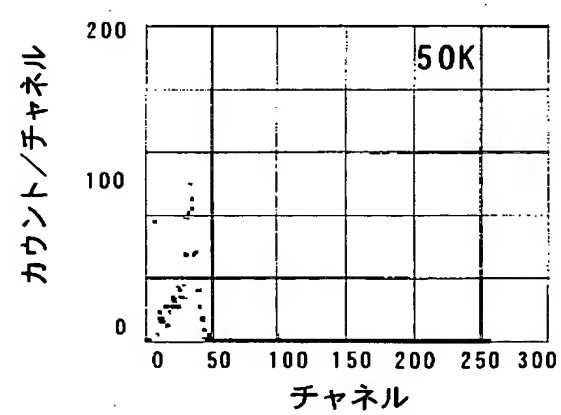
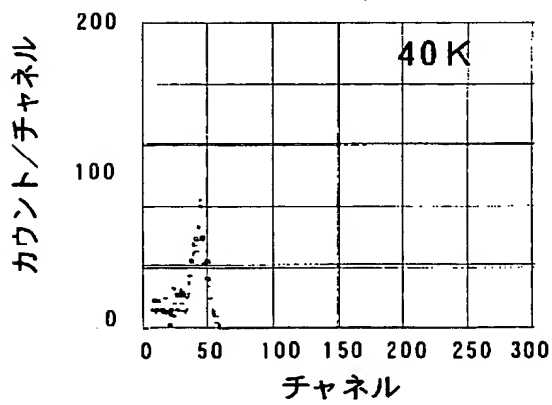
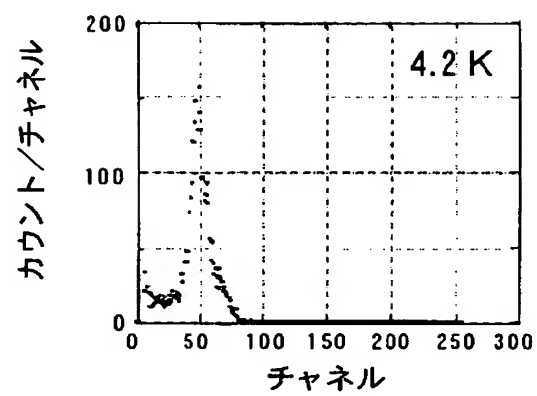
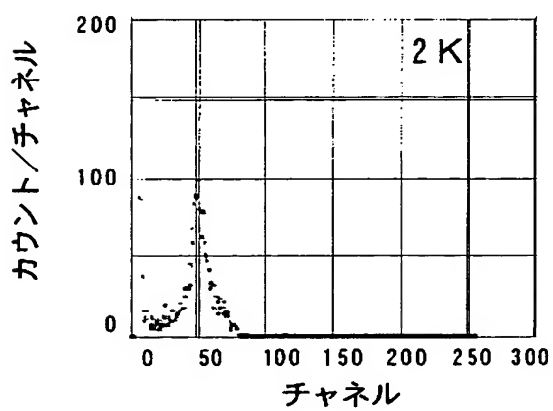
【図 2】



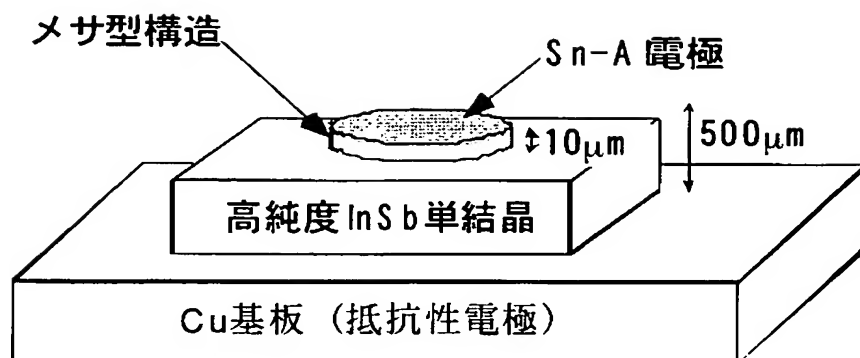
【図 3】



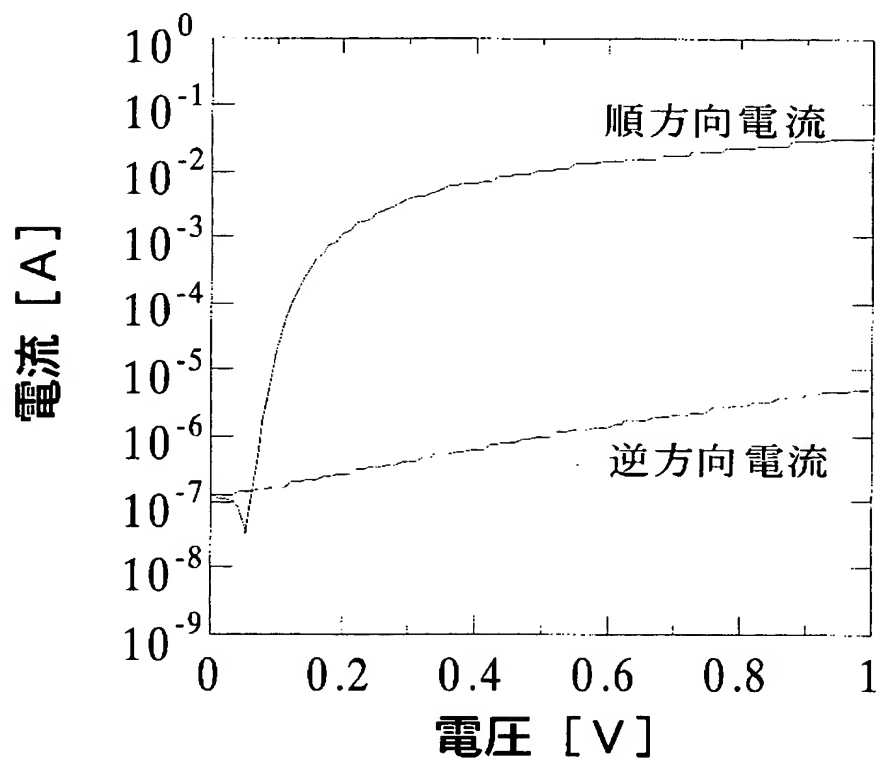
【図 4】



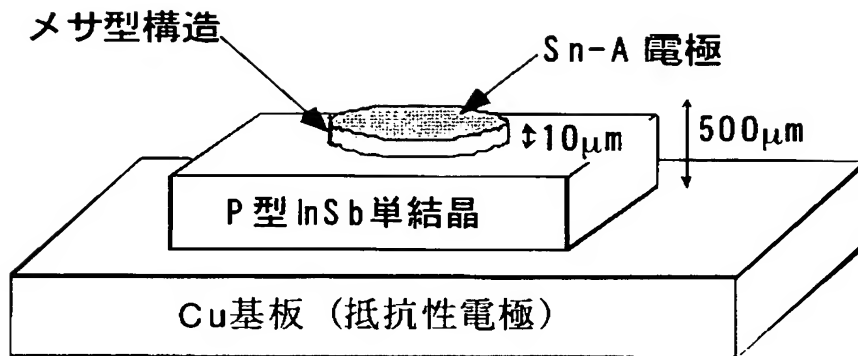
【図 5】



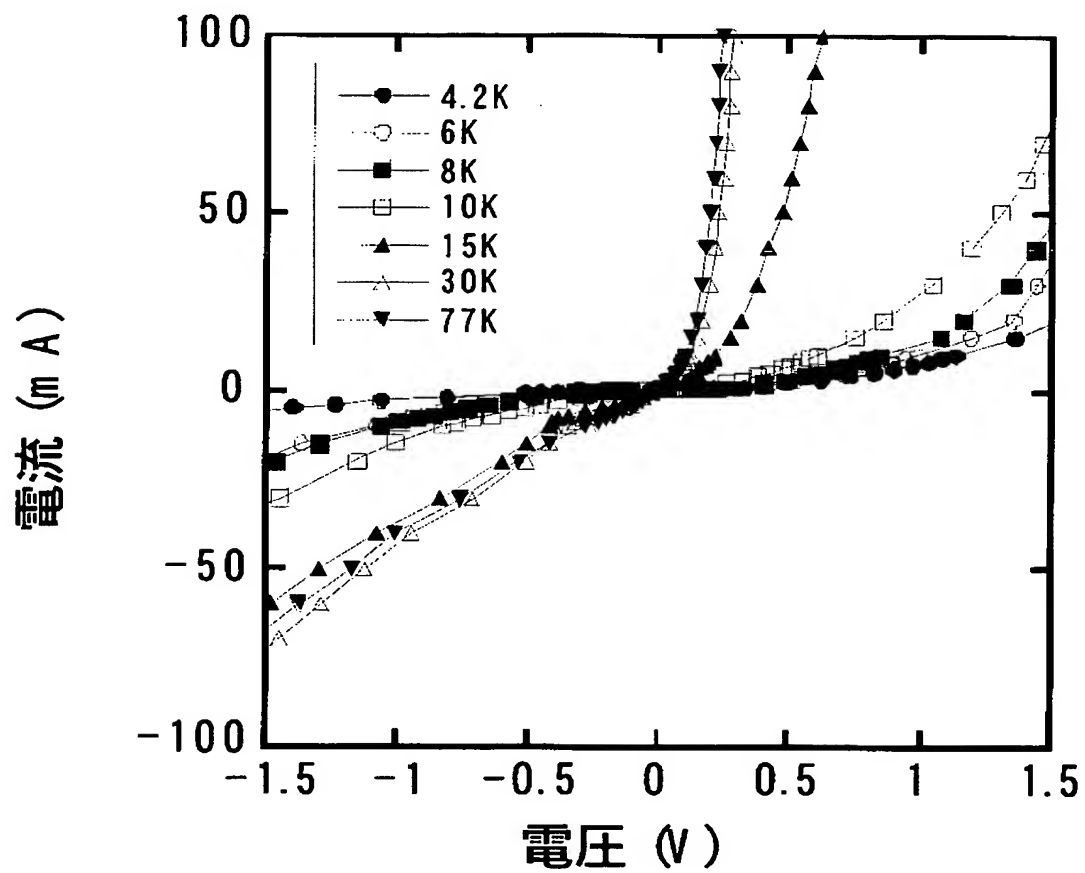
【図 6】



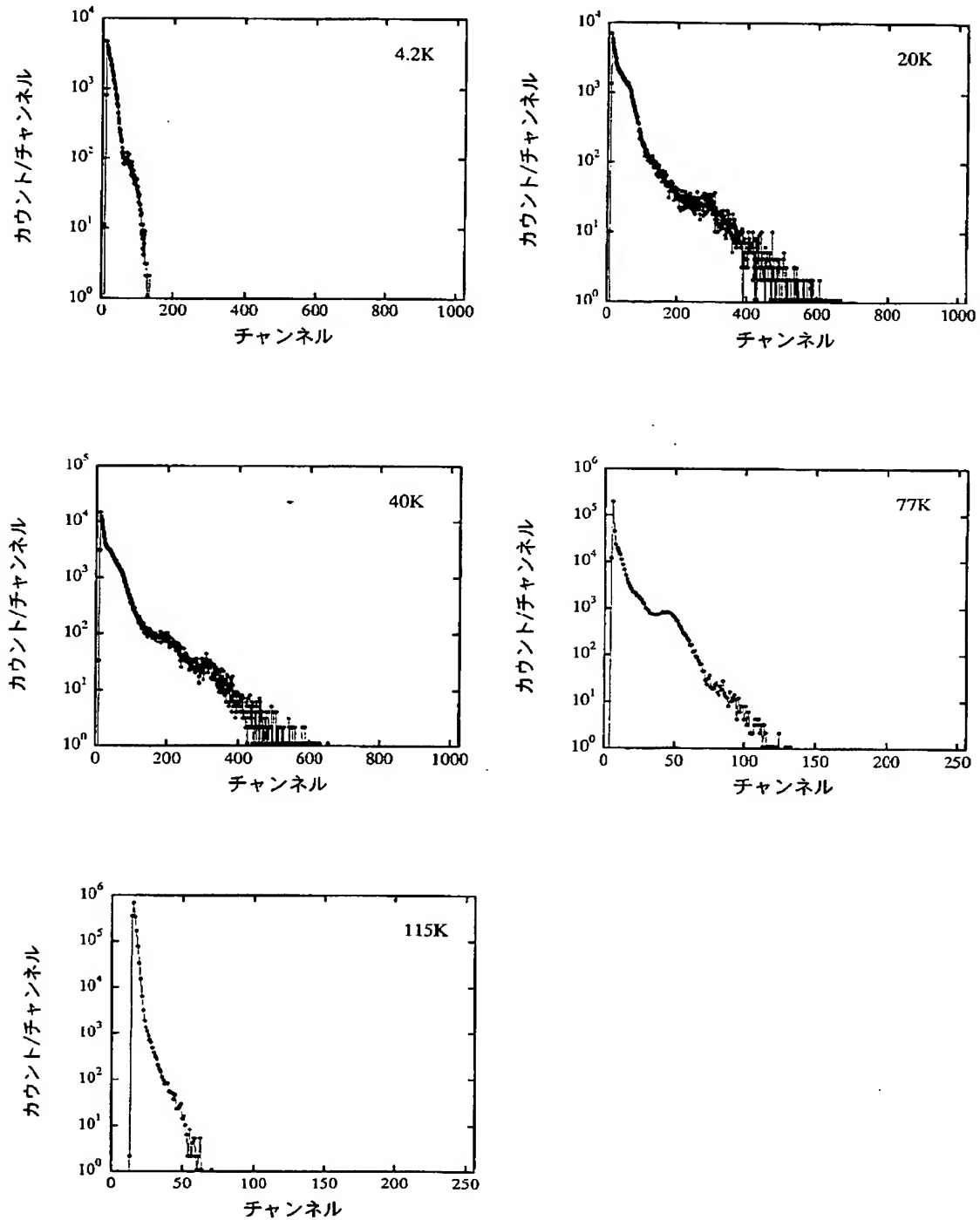
【図7】



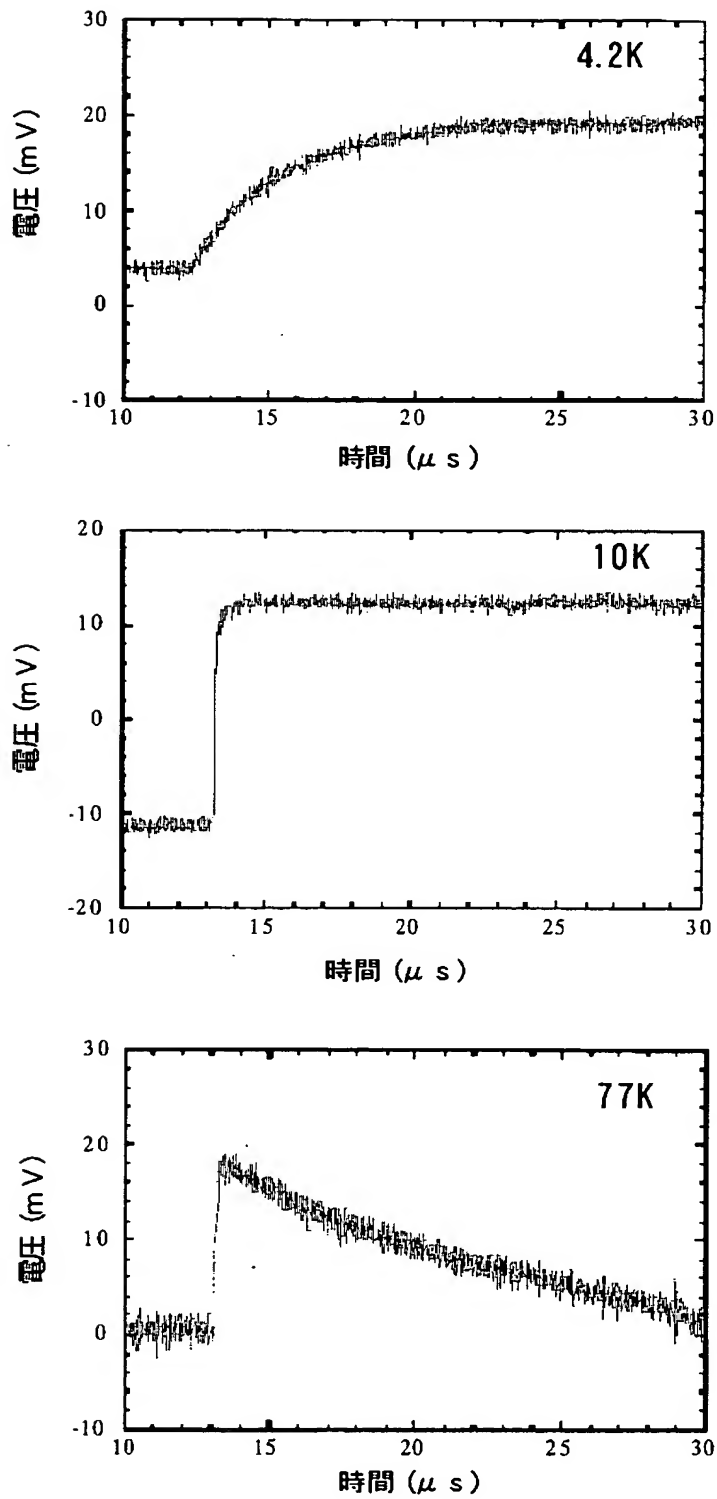
【図8】



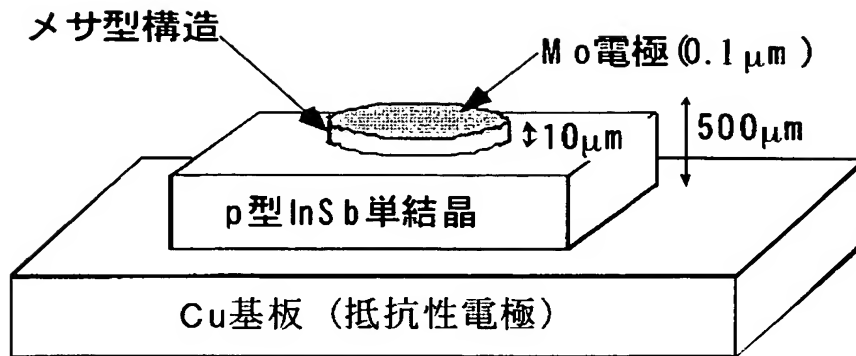
【図 9】



【図 10】



【図11】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】

10 K以上の温度でも漏洩電流が小さく、電子あるいは正孔のトラップングが少なく電荷生成量の多い表面障壁型あるいはp n接合型のI n S b単結晶を用いた半導体放射線検出器を製作する。

【解決手段】

放射線の検出媒体として、不純物を人工的にドーピングしない高純度I n S b単結晶を用い、かつダイオード特性を得るため、A u・P d合金を用いて表面障壁型電極を形成した半導体放射線検出器を製作する。特性試験の結果、4.2 Kでのダイオード特性は素子抵抗が1.4 k Ω と大きく、電荷有感型前置増幅器の出力信号のライズタイムも0.4 μ sと短く、電子あるいは正孔のトラップングの少ない半導体放射線検出器となることが確認された。また、本半導体検出器は2 Kから50 Kの温度範囲で α 線スペクトルを測定できた。

【選択図】 図1

特願 2 0 0 3 - 0 1 7 3 1 0

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号

[0 0 0 0 0 4 0 9 7]

1. 変更年月日

1 9 9 0 年 8 月 1 6 日

[変更理由]

新規登録

住 所

東京都千代田区内幸町 2 丁目 2 番 2 号

氏 名

日本原子力研究所

2. 変更年月日

2 0 0 3 年 1 月 2 7 日

[変更理由]

住所変更

住 所

千葉県柏市末広町 1 4 番 1 号

氏 名

日本原子力研究所